塔克拉玛干沙漠南缘戈壁下垫面辐射平衡与地表反照率特征

邢立文[1,2]，赵景峰[1,2]，何　清[3]，李　娟[1,2]，苏华丽[1,2]，何亚玲[1,2]

（1. 四川师范大学地理与资源科学学院，四川 成都　610068；2. 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室，四川 成都　610068；3. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要： 戈壁是荒漠地区主要的地表形式之一，这种下垫面特征与沙漠下垫面有较大差异，因此对于沙漠地区戈壁下垫面辐射平衡特征的研究十分有必要。利用中日沙尘暴合作项目（ADEC）塔克拉玛干沙漠南缘策勒戈壁观测站连续观测数据，分析了策勒戈壁站地表辐射平衡各分量全年、各季节与特殊天气下的日变化特征，以期为塔克拉玛干沙漠地-气系统能量交换提供更加具体的参数。结果表明：(1) 策勒戈壁站各辐射分量最大值除向上短波辐射出现在1月外，其余各分量均出现在7月。(2) 季节尺度上，各分量季节日变化最大峰值出现季节不一致，向下短波辐射和向上短波辐射最大峰值出现在春季，向下长波辐射、向上长波辐射和净辐射最大峰值出现在夏季。(3) 不同天气下，各季节晴天各辐射分量均呈现平滑的变化趋势，多云、阴天、降雨期间各分量变化不规则，降雨和降雪天气向下长波辐射和向上长波辐射明显高于其余各分量。(4) 地表反照率年均值为0.32，其中冬季降雪导致地表反照率远高于其他季节，各季节的次序表现为：冬季、春季、秋季、夏季。而反照率的日变化受太阳高度角影响，晴天呈现出平滑的"U"型，其他天气变化不规则。

关 键 词： 辐射平衡；净辐射；地表反照率；戈壁下垫面

文章编号： 1000－6060(2024)05－0762－11(0762～0772)

太阳辐射是地球表面的主要能量来源，是气候变化和地表生命活动的主要动力[1]。地表辐射平衡表征地表对于太阳辐射能量的净收支状况[2]，是地气之间能量交换的重要内容[3-4]，也是全球变化和气候异常研究中极为关注的方面[5]。地表辐射收支平衡的研究，对于气候状态的客观量测以及未来气候变化的预估具有十分重要的意义[6-7]。近年来，国内外众多科学家在不同地区开展了众多野外观测实验，在地表辐射平衡方面取得了诸多进展[8-11]。国内相关学者在高原[12-13]、沙漠[14]、戈壁[15]等不同干旱半干旱地区开展了大量野外观测实验，均取得了丰厚的研究成果，为后续相关研究提供了丰富的理论支撑和参考依据。

干旱半干旱地区由于其独特的地理环境和地表反照率，在能量和物质循环方面有着其特有规律，太阳辐射收支过程也与其他生态系统有着截然不同的变化，对于沙漠地区辐射平衡与地-气间相互作用的探索一直以来都是干旱地区研究的重点[16-18]。塔克拉玛干沙漠是我国最大的流动性沙漠，其广阔的面积和复杂的地理环境对我国西北地区乃至全国气候变化和生态环境都有着重要影响[19-20]。胡列群等[21]对塔克拉玛干沙漠辐射平衡在不同季节的日变化以及年变化进行了分析，得出了沙漠腹地年辐射平衡为全疆低值中心。何清等[22]分析塔克拉玛干沙漠的散射辐射状况，得出了沙漠地区水汽对于散射辐射的影响作用大于沙尘。李帅等[23]对塔克拉玛干沙漠腹地流动沙漠区的辐射收支特征进行了研究，结果表明向下短波辐射在夏

收稿日期： 2023-09-26；　**修订日期：** 2023-12-03
基金项目： 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk030501)资助
作者简介： 邢立文(1998-)，男，硕士研究生，主要从事地表辐射平衡研究. E-mail: x593886258@163.com
通讯作者： 赵景峰(1965-)，男，博士，教授，主要从事荒漠环境研究. E-mail: zhaojf@ms.xjb.ac.cn

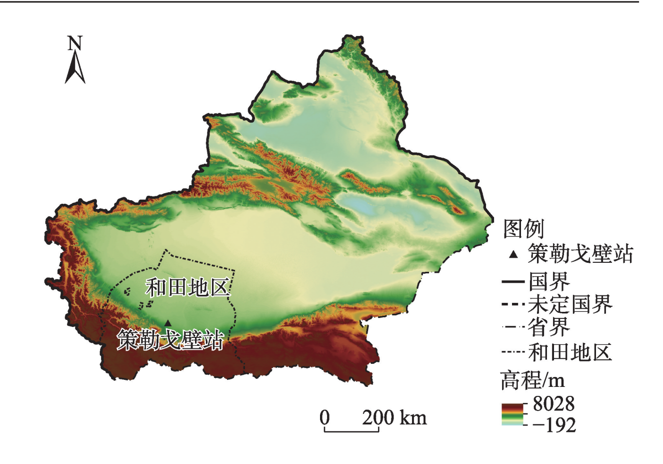
季某些特定天气下非常接近太阳常数。慕文玲等[24]对塔中的人工绿地和自然沙面的辐射平衡做了对比研究，得出了净辐射日均值人工绿地小于自然沙面。付光祥等[25]研究了塔克拉玛干沙漠南缘生态过渡区的辐射平衡特征，结果表明，该地区在季节尺度上，向下短波和向上短波均为春季最大、冬季最小，其余各辐射分量则为夏季最大、冬季最小。但是已有研究均是对塔克拉玛干沙漠腹地和南缘沙漠下垫面的研究，而针对沙漠地区戈壁下垫面辐射平衡的研究在已发表的研究成果中仍较少，而戈壁作为沙漠地区地表下垫面的重要类型，对沙漠地区气候的形成有深刻影响，在沙尘暴、浮尘等灾害天气的影响中扮演了重要角色[26]。

塔克拉玛干沙漠南缘属于生态过渡区，戈壁面积广布且戈壁类型典型，对于该地区戈壁下垫面辐射平衡的研究，能够更加详细地揭示出戈壁下垫面对于该沙漠地区地-气之间相互作用的影响。因此，本文利用中日沙尘暴合作项目（ADEC）策勒戈壁站数据，分析了塔克拉玛干沙漠南缘戈壁下垫面的辐射平衡与地表反照率在不同时间尺度和不同天气条件下的变化特征，为当地沙尘暴、干旱等灾害天气的预测提供更加丰富的理论依据，以及为后续戈壁下垫面与沙漠下垫面辐射平衡的对比研究提供参考依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

塔克拉玛干沙漠是我国最大的沙漠，也是世界第二大流动沙漠，位于塔里木盆地中部，面积约为33.76×10^4 km^2。其深居欧亚大陆内部，远离海洋，气候干旱，植被稀少，沙丘类型复杂且流动性大，是我国沙尘暴的主要起源地之一[27]。塔克拉玛干沙漠南缘策勒县主要由山区、平原绿洲和沙漠三大部分组成，处于沙漠和山地的过渡地带，地势总体上南部高、北部低，平均海拔3979 m，全年日照时间长，太阳能资源丰富（图1）。



注：该图基于新疆标准地图服务网站下载的审图号为新S(2023)061号标准地图制作，底图边界无修改。

图1　观测点地理位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the geographical location of the observation site

1.2　数据来源

观测场地位于策勒县城以南，地表平坦的策勒绿洲附近的戈壁滩（地表为砾石，36°54′07″N，80°47′07″E，海拔1528 m）。观测仪器为荷兰Kipp&Zonen公司生产的辐射四分量（CNR1）观测仪，辐射传感器距地面高度1.5 m，采样频率1次·(10s)$^{-1}$，输出值为30 min的平均值。本文选取2001年3月25日—2002年3月24日连续同步观测的四分量数据[向下短波辐射（DR）、向上短波辐射（UR）、向下长波辐射（DLR），向上长波辐射（ULR）]，对辐射平衡和地表反照率特征进行分析。为了保证分析结果的准确性，本文将向下短波辐射与向上短波辐射小于20 W·m^{-2}的数据设置为0[28]，采用时间均为地方时，比北京时间晚2.6 h。

1.3　研究方法

1.3.1　净辐射与地表反照率[12]

$$R_n = DR - UR + DLR - ULR \tag{1}$$

$$a = UR/DR \tag{2}$$

式中：R_n 为净辐射；DR为向下短波辐射；UR为向上短波辐射；DLR为向下长波辐射；ULR为向上长波辐射；a 为地表反照率。

1.3.2　晴空指数[10]

$$K_t = DR/S_0' \tag{3}$$

$$S_0' = S_0 \sin\theta = \overline{S}_0 d_m^2 \sin\theta \tag{4}$$

$$\sin\theta = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \tag{5}$$

式中：K_t 为晴空指数，表征太阳辐射对云量变化和大气透明度的响应；S_0' 为到达大气顶界的太阳辐射；S_0 为不同日地距离时大气上界与日光垂直平面上的太阳积分辐照度；$\overline{S}_0$ 为太阳常数，取值1367 W·m^{-2}；d_m 为日地距离订正因数，等于日地平均距离与日地实际距离的比值；θ 为太阳高度角；φ 为当地纬度；δ 为每天的太阳赤纬；ω 为时角。

2 结果与分析

2.1 辐射平衡各分量变化特征

2.1.1 辐射平衡各分量逐日变化 辐射通量又称为辐射功率，是指在单位面积，单位时间内所通过的辐射[12]。2001年3月25日—2002年3月24日塔克拉玛干沙漠南缘戈壁下垫面辐射平衡各分量逐日均值变化如图2所示。各辐射分量变化趋势大体一致，季节变化明显，变化幅度为向下短波辐射>向上长波辐射>向下长波辐射>向上短波辐射>净辐射，对应变幅值分别为：543.17 W·m^{-2}、282.68 W·m^{-2}、265.00 W·m^{-2}、239.48 W·m^{-2}、146.74 W·m^{-2}。

向下短波辐射的最大值（596.60 W·m^{-2}）出现在7月31日，最小值（53.51 W·m^{-2}）出现在4月8日，全年的平均值为400.88 W·m^{-2}。由表1所示，年曝辐量为6053.31 MJ·m^{-2}。向下短波辐射最大瞬时值（1040.70 W·m^{-2}）出现在6月25日15:00。向下短波辐射的季节变化明显，变幅上春季和夏季较大，秋季和冬季较小。

向上短波辐射主要受太阳向下短波辐射与地表性质的影响[10]，最大值（258.34 W·m^{-2}）出现在1月19日，最小值（18.86 W·m^{-2}）出现在7月16日，年曝辐量为1841.44 MJ·m^{-2}。向上短波辐射变化趋势大致和向下短波辐射一致，但变化幅度较小。由于降雪会极大的增加地表对于太阳向下短波辐射的反射，因此在冬季降雪期间，向上短波辐射出现了突然增大，并伴随着雪的融化而随之下降。

向下长波辐射即大气逆辐射，受大气湿度、温度和云量的影响比较大。塔克拉玛干沙漠南缘冬季干燥少雨，因此向下长波辐射冬季最小，最小值（173.85 W·m^{-2}）出现在在1月21日，观测期间最大值（438.85 W·m^{-2}）出现在7月22日，年曝辐量9800.34 MJ·m^{-2}。

地表吸收太阳短波辐射，并且以长波辐射的形式向上释放能量。向上长波辐射的变化趋势与向下长波辐射大体一致，变化幅度要大于向下长波辐射。向上长波辐射最大值（523.34 W·m^{-2}）出现在7月1日，最小值（240.66 W·m^{-2}）出现在1月21日。年曝辐量为12496.89 MJ·m^{-2}。春季和夏季的振幅要

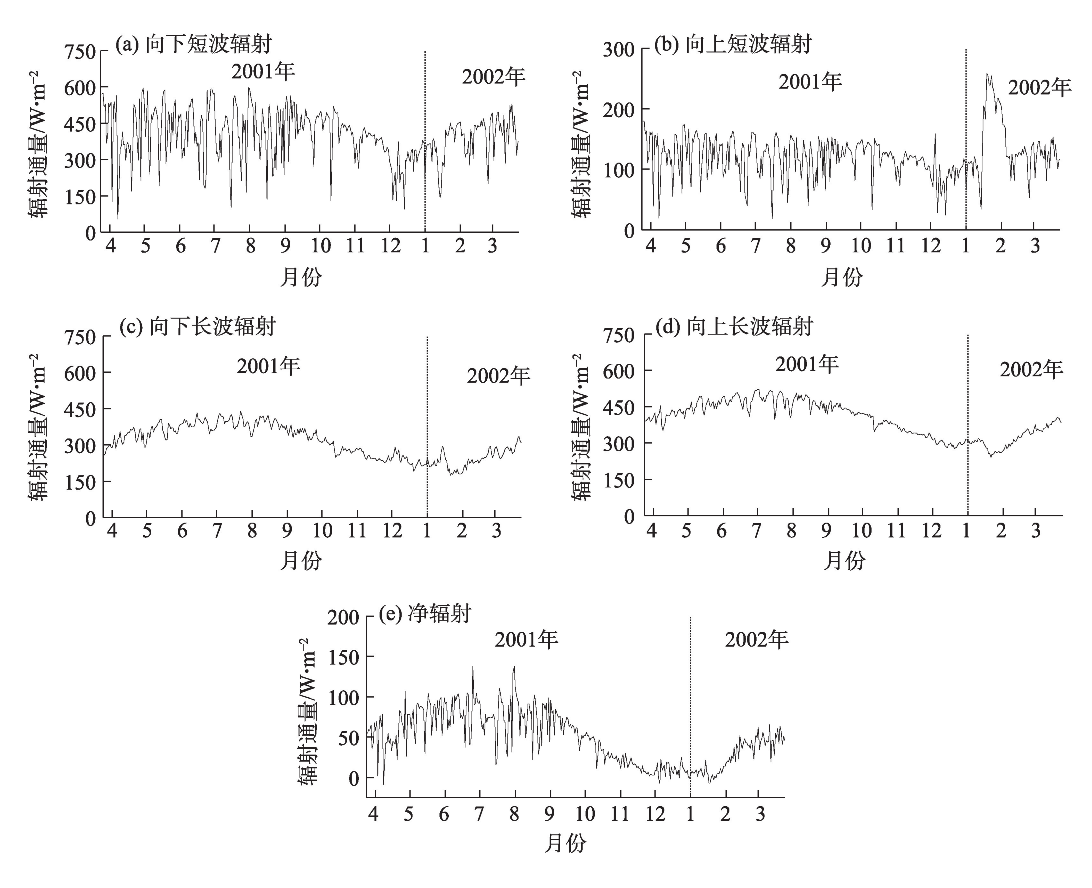


图2 2001年3月—2002年3月站各辐射分量逐日变化

Fig. 2 Daily variations in the components of the radiation at the Qira gobi station from March 2001 to March 2002

表1　策勒戈壁站辐射平衡各分量季节及年曝辐量变化

Tab. 1　Seasonal and annual variations in radiation exposure of each component of the radiation balance at the Qira gobi station　/MJ·m^{-2}

季节	向下短波辐射	向上短波辐射	向下长波辐射	向上长波辐射	净辐射
春季	1723.72	518.87	2593.24	3318.75	479.34
夏季	1801.39	510.07	3109.98	3782.76	618.53
秋季	1478.97	427.63	2309.46	3067.54	293.25
冬季	1049.24	384.87	1787.65	2327.83	124.19
全年	6053.31	1841.44	9800.34	12496.89	1515.32

明显大于秋季和冬季。

净辐射为地表最终获得太阳辐射能量的大小，其最大值和最小值分别出现在7月31日和4月8日，分别为138.24 W·m^{-2}和−8.50 W·m^{-2}，年曝辐量为1515.32 MJ·m^{-2}。在观测期间有10 d的净辐射值为负值，其中1 d出现在春季降雨天气，其余9 d出现在冬季降雪天气。净辐射春季和夏季的振幅比较大，秋季和冬季的振幅比较小。

2.1.2　辐射平衡各分量季节日变化　通过对策勒戈壁站春季、夏季、秋季、冬季4个季节各辐射分量平均日变化（图3）分析可见，向上长波辐射的峰值均滞后于向下短波辐射，除春季滞后1 h外，其余季节均滞后0.5 h。

各季节向下短波辐射的变化趋势均为单峰型，春季为11:30达到峰值709.93 W·m^{-2}，夏季12:30达到峰值708.03 W·m^{-2}，秋季和冬季12:00达到峰值，分别为682.48 W·m^{-2}、533.55 W·m^{-2}。向下短波辐射的季节变化明显，表现为夏季>春季>秋季>冬季，对应均值分别为226.62 W·m^{-2}、216.85 W·m^{-2}、188.11 W·m^{-2}、129.44 W·m^{-2}。随着太阳高度角的变化，策勒接受太阳辐射时长春季平均14 h，夏季为14.5 h，秋季为12.5 h，冬季为10.5 h。向上短波辐射变化趋势与向下短波辐射基本保持一致，但是振幅小于向下短波辐射，除春季为11:30达到峰值外，其余季节均为12:00达到峰值，对应值为208.67 W·m^{-2}、194.62 W·m^{-2}、189.97 W·m^{-2}、184.16 W·m^{-2}。

向下长波辐射在各季节日变化最平缓，但是辐

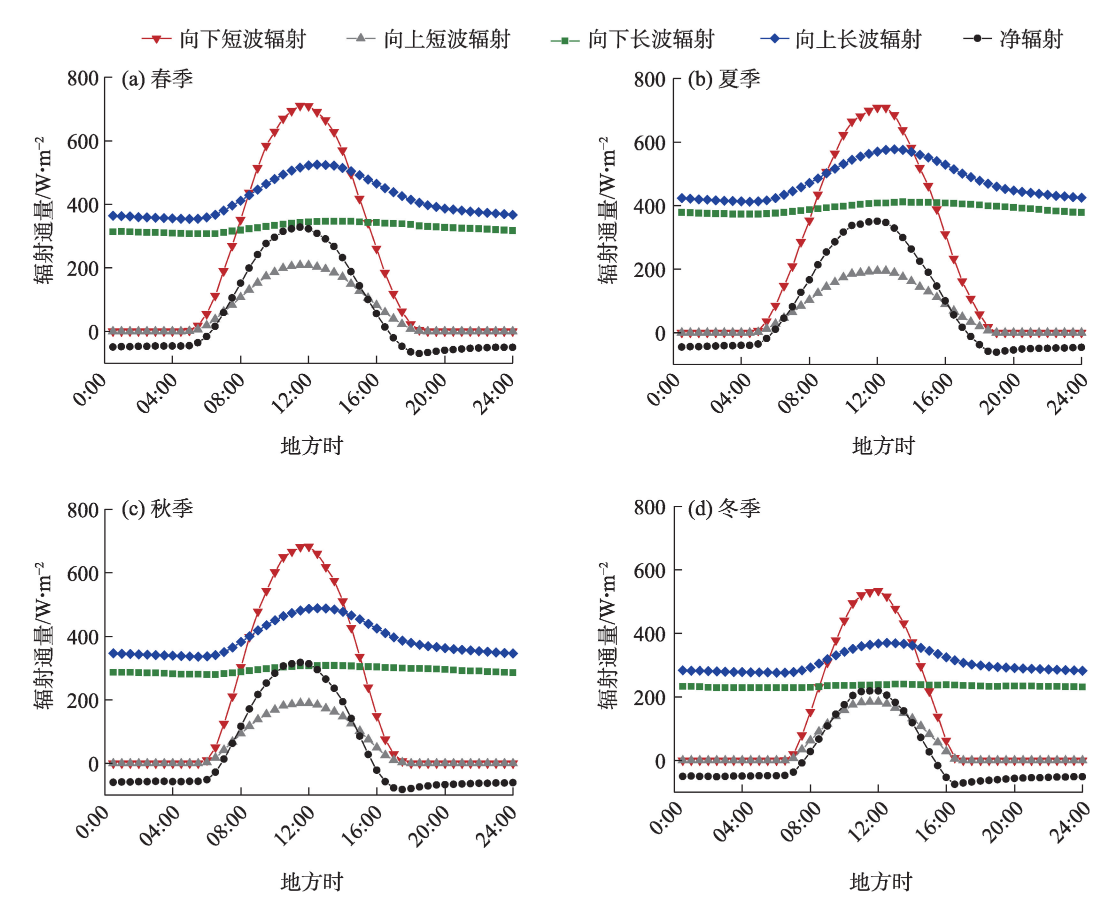


图3　策勒戈壁站辐射平衡各季节日变化特征

Fig. 3　Diurnal variation characteristics of radiation balance in each season at the Qira gobi station

射通量大小季节差异明显，夏季最大、冬季最小，对应峰值分别为410.82 W·m⁻²、239.99 W·m⁻²。向上长波辐射在春季、秋季、冬季均于12:30达到峰值，对应值分别为525.05 W·m⁻²、488.74 W·m⁻²、370.35 W·m⁻²，夏季于13:00达到峰值577.47 W·m⁻²。向上长波辐射的强度主要取决于向下短波辐射，因此该类辐射在夜间变化不明显，最小值出现在日出前后。

净辐射表示地表最终获得能量的大小，春季、秋季、冬季最大值均出现在11:30，对应值分别为327.91 W·m⁻²、317.48 W·m⁻²、218.98 W·m⁻²，夏季最大值出现在12:00，为350.43 W·m⁻²。净辐射最小值出现在日落前0.5~1 h之内，夜间净辐射均为负值，表明地表在向外释放能量。

2.1.3 各季节不同天气下辐射平衡各分量日变化 由表2所示，从2001年3月25日—2002年3月24日之间每个季节选出典型天气（晴天、多云、阴天、降雨和降雪），分析策勒戈壁站各辐射分量变化特征。

表2 策勒戈壁站各季节代表天气日期

Tab. 2 Representative weather dates in each season at the Qira gobi station

季节	晴天	多云	阴天	降雨(雪)
春季	2001-05-04	2001-04-12	2001-04-09	2001-04-03
夏季	2001-06-29	2001-06-16	2001-06-23	2001-07-16
秋季	2001-10-13	2001-09-25	2001-09-04	2001-10-11
冬季	2001-02-04	2001-12-10	2001-12-14	2001-12-04

由图4分析可见，策勒戈壁站各辐射分量在不同的天气情况下表现出不同的变化特征，各季节晴天各辐射分量均呈现出平滑的变化趋势，且变幅最大。多云和阴天的变幅小于晴天，降雨和降雪期间各分量变化趋势不规则。

春季各辐射分量在降雨时的变化趋势为“多峰型”，其余天气均为“单峰型”。向下短波辐射在晴天、多云、阴天、降雨时的峰值分别为1001.90 W·m⁻²、667.60 W·m⁻²、366.02 W·m⁻²、227.99 W·m⁻²。向上

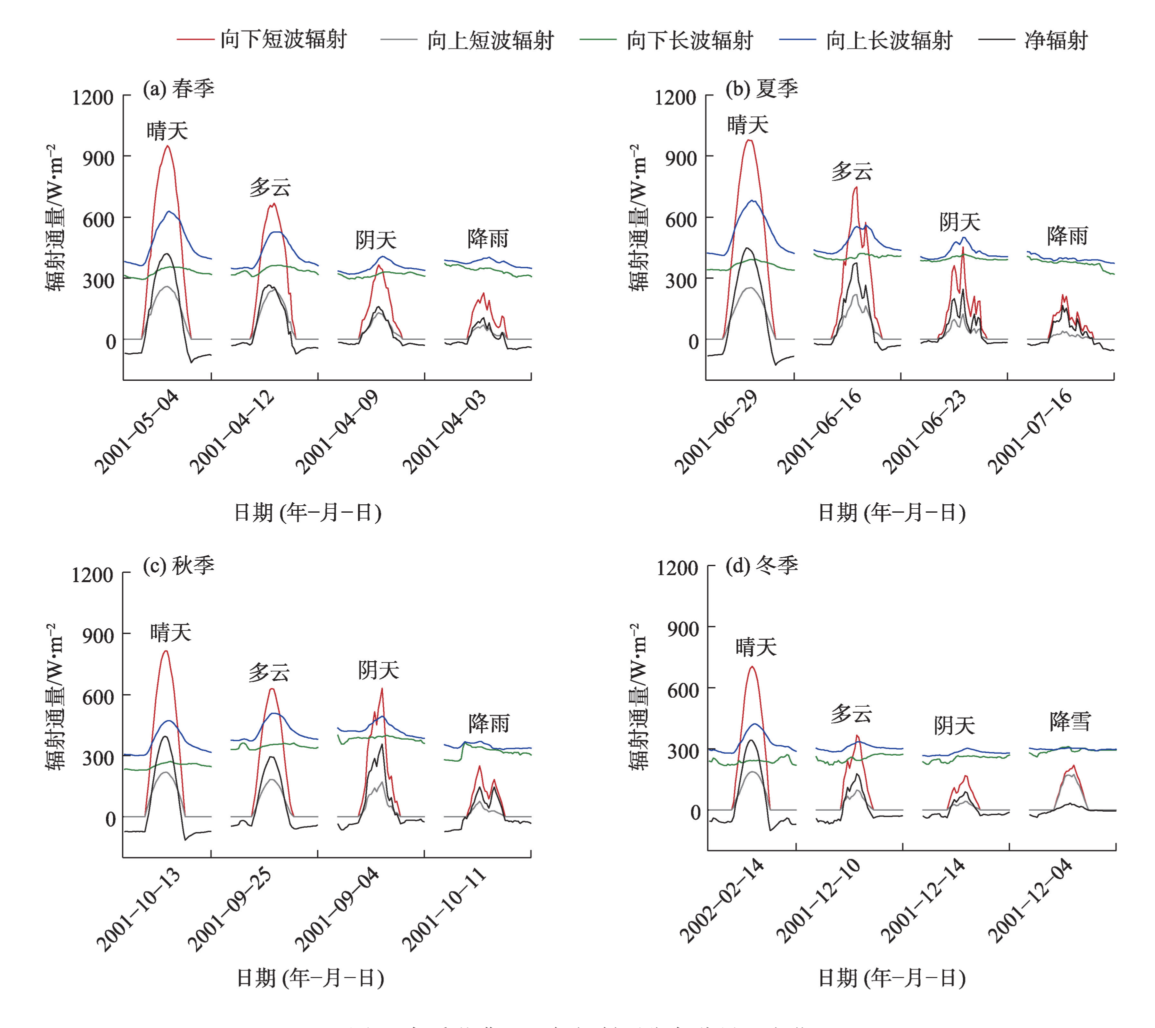


图4 各季节典型天气辐射平衡各分量日变化

Fig. 4 Daily variation of each component of the typical weather radiation balance in different seasons

短波辐射在晴天、多云、阴天、降雨时的峰值分别为287.35 W·m^{-2}、245.61 W·m^{-2}、131.64 W·m^{-2}、70.67 W·m^{-2}。由降雨期间晴空指数相比较于其他几种天气最低导致降雨期间获得的向下短波辐射也最低,同时由于降雨会降低地表反照率,因此降雨期间的向上短波辐射最低。向下长波辐射在晴天、多云、阴天、降雨时的峰值分别为311.48 W·m^{-2}、362.58 W·m^{-2}、330.55 W·m^{-2}、372.01 W·m^{-2},表明向下长波辐射与云量和空气湿度密切相关。向上长波辐射受向下短波辐射的影响,表现为晴天时最大,降雨时最小。净辐射受其他各辐射分量的影响在晴天、多云、阴天、降雨时峰值分别为433.72 W·m^{-2}、267.26 W·m^{-2}、160.94 W·m^{-2}、106.89 W·m^{-2}。

在夏季,除向下长波辐射外,其余辐射各分量的变化幅度表现为晴天>多云>阴天>降雨。各辐射分量除晴天为"单峰型"外,其余天气状况下均为"多峰型",降雨期间向下长波辐射和向上长波辐射呈现出下降趋势。晴天各辐射分量变化平滑,向下短波辐射11:30达到峰值979.20 W·m^{-2},向下短波辐射受云量的影响在多云、阴天、降雨时峰值分别为748.15 W·m^{-2}、453.35 W·m^{-2}、219.13 W·m^{-2}。向下长波辐射在多云和阴天的变化幅度和大小相差不大,峰值分别为421.51 W·m^{-2}、417.51 W·m^{-2}。向上长波辐射在晴天、多云、阴天、降雨时的最低值分别为412.07 W·m^{-2}、420.42 W·m^{-2}、394.24 W·m^{-2}、373.95 W·m^{-2},向上长波辐射的峰值在不同天气相差比较大,而最低值相差较小。

受太阳直射点南移的影响,秋季晴天辐射各分量峰值要明显低于夏季,向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射、净辐射峰值分别为814.37 W·m^{-2}、218.09 W·m^{-2}、271.27 W·m^{-2}、472.89 W·m^{-2}、395.55 W·m^{-2}。多云天气各辐射分量虽变化较为平滑,但受天空云量的影响,向下短波辐射和向上短波辐射的峰值要明显低于晴天。而向下长波辐射和向上长波辐射的峰值均要高于晴天,分别为359.60 W·m^{-2}、508.15 W·m^{-2},多云天气大气逆辐射对于大气的保温作用要明显强于晴天。

冬季在降雪天气,向上短波辐射增大并且接近于向下短波辐射,明显区别于其他天气下的变化,峰值为175.19 W·m^{-2}。向下长波辐射在不同天气变化幅度不明显。而向上长波辐射在降雪天气下变化呈"直线"。净辐射在晴天、多云、阴天和降雪时的日累积值分别为3.58 MJ·m^{-2}、0.10 MJ·m^{-2}、−0.19 MJ·m^{-2}、−0.01 MJ·m^{-2}。

2.2 地表反照率变化特征

2.2.1 地表反照率逐日变化 地表反照率表征地表对于太阳向下短波辐射的反射能力,其变化会影响到地−气系统的能量收支平衡。由图5分析可见,塔克拉玛干沙漠南缘策勒戈壁站年平均地表反照率为0.32,最低值(0.16)出现在2001年7月30日(降雨),最大值(0.86)出现在2001年12月4日(降雪)。降雨会降低地表反照率,而降雪会增大地表反照率。地表反照率季节平均冬季>春季>秋季>夏季,对应值分别为0.38、0.31、0.30、0.29,冬季由于降雪影响,所以冬季地表反照率最大,春季、夏季、秋季差异不大。

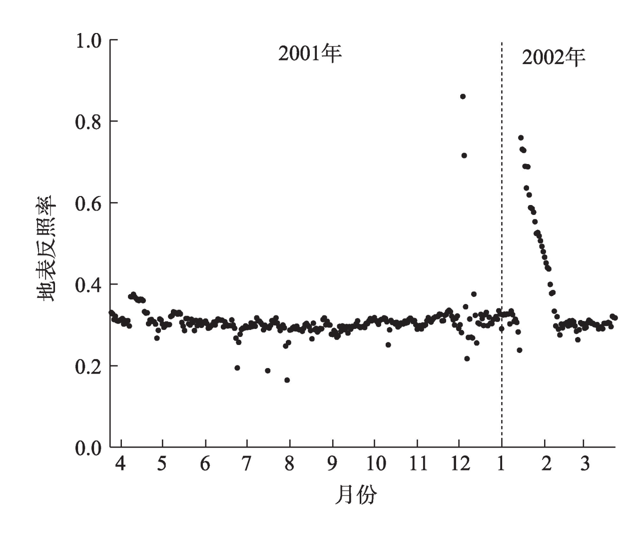


图5 策勒戈壁站地表反照率逐日变化

Fig. 5 Daily variation of surface albedo at the Qira gobi Station

2.2.2 各季节不同天气下地表反照率日变化 地表反照率受太阳高度角影响明显,与太阳高度角呈现负相关的关系,由图6所示,所有季节晴天地表反照率变化呈现出平滑的"U"型变化趋势。晴天地表反照率在春季的最大值和最小值分别为0.40、0.28,夏季为0.39、0.26,秋季为0.42、0.27,冬季为0.35、0.27,日变化幅度表现为秋季>夏季>春季>冬季。各季节多云和阴天地表反照率的变化趋势呈不规则的"U"型,受太阳高度角的影响不再显著。降雨期间春季和秋季地表反照变化趋势不规则,太阳高度角在此时不再是地表反照率变化的主要影响因素,春季、夏季、秋季降雨期间的平均地表反照率低于其他天气,而冬季受降雪影响要明显高于其他天气。

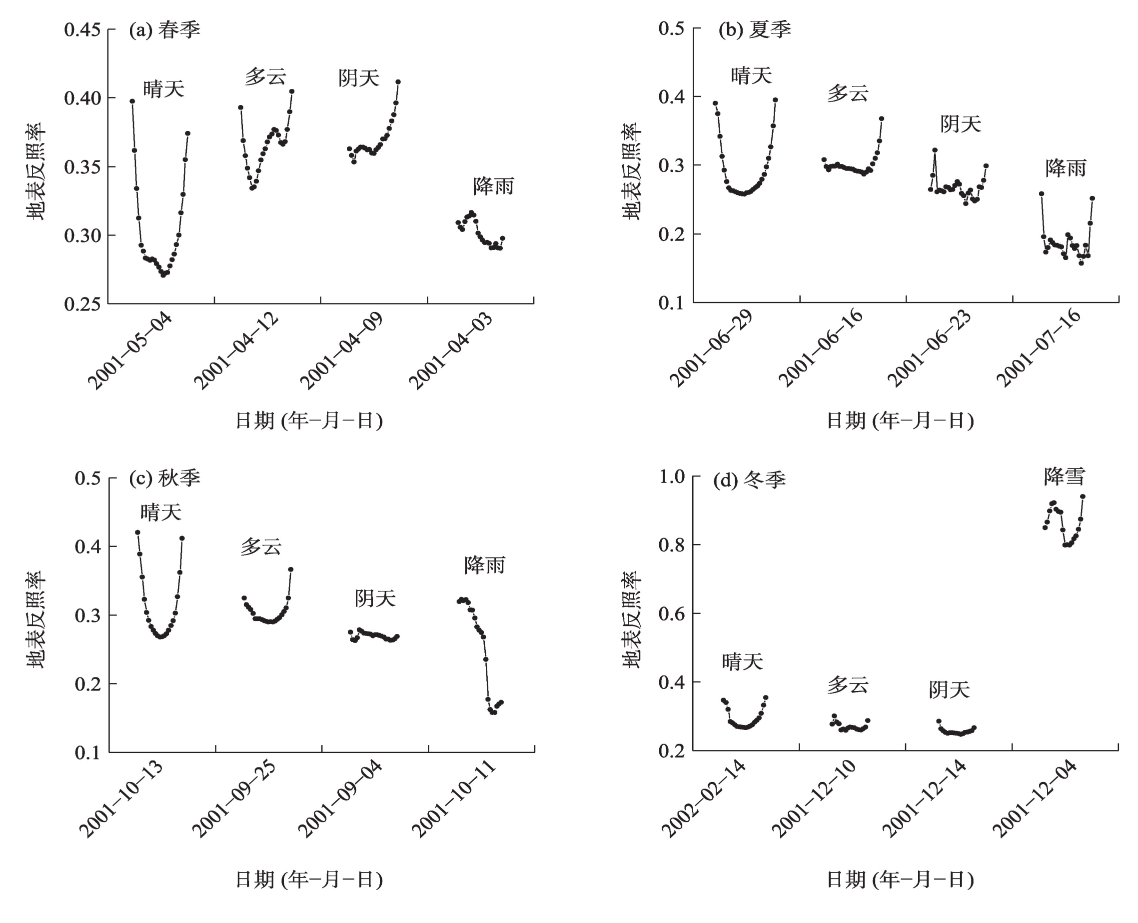


图6 各季节典型天气地表反照率日变化

Fig. 6 Daily variation of surface albedo in typical weather of each season

2.2.3 太阳高度角与向下短波辐射、向上短波辐射、地表反照率的关系 由图7分析可见,向下短波辐射和向上短波辐射随着太阳高度角的增大而增大,但向下短波辐射和向上短波辐射的最大值并不是出现在太阳高度角最大时候,因为太阳高度角只是影响太阳辐射的因素之一,大气条件、日照时间、地形、地貌等都会对其造成不同程度的影响。地表反照率随着太阳高度角的增大而降低,降低速度先快后慢。夏季太阳高度角最大值为77°,冬季为45°,春季大于秋季。因此,向下短波辐射和向上短波辐射相应的为夏季最大、冬季最小、春季大于秋季。由表3分析可见,冬季向下短波辐射、向上短波辐射、地表反照随太阳高度角离散度最大,而秋季的离散度最小,造成离散度差异的原因主要是降雨和降雪。

3 讨论

塔克拉玛干沙漠南缘策勒戈壁站净辐射全年逐日变化特征夏季最大,春季和秋季次之,冬季最小。这与羌塘高原申扎站[3]、塔中站[23]、西藏羊八井站[10]、东疆黑戈壁[15]的研究结果一致。策勒戈壁站净辐射年曝辐量为1515 MJ·m^{-2},古尔班通古特沙漠为1441.84 MJ·m^{-2}[28],与策勒戈壁站接近,高于东帕米尔高原(1189 MJ·m^{-2})[12],策勒戈壁站与东帕米尔高原纬度接近,但气候类型不同,导致东帕米尔高原向下短波辐射(5001.6 MJ·m^{-2})明显低于策勒戈壁站。而对比塔中站年净辐射曝辐量为2286 MJ·m^{-2},比策勒戈壁站高771 MJ·m^{-2},主要是因为策勒海拔高于塔中,冬季积雪融化慢,而积雪会明显增加地表反照率[29],导致策勒戈壁站向下短波辐射(6053 MJ·m^{-2})低于塔中(6678 MJ·m^{-2}),而向上短波辐射(1841 MJ·m^{-2})却高于塔中(1654 MJ·m^{-2})[1]。塔中向上短波辐射年最大值为264 W·m^{-2}(4月),而策勒戈壁站为423.99 W·m^{-2}(1月)。

同我国其他地区相比较,策勒戈壁站辐射平衡各分量受天气的影响同样明显,与东帕米尔高原[12],古尔班通古特沙漠[28]研究结果相一致,各分量在晴

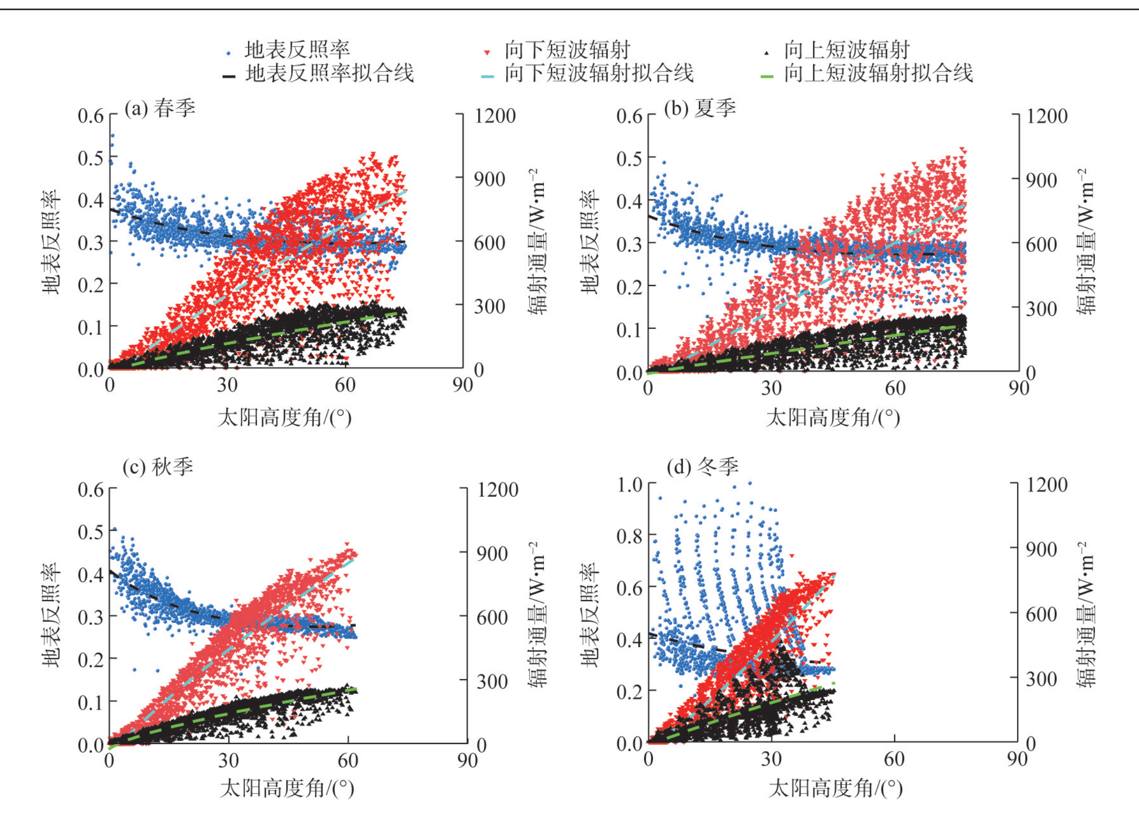


图7　各季节向下短波辐射、向上短波辐射、地表反照率与太阳高度角的关系

Fig. 7　Relationship between solar zenith angle to downward shortwave radiation, upward shortwave radiation and land surface albedo in each season

表3　向下短波辐射、向上短波辐射、地表反照率随太阳高度角变化回归方程

Tab. 3　Regression equations for downward shortwave radiation, upward shortwave radiation, and surface albedo as a function of solar altitude angle

季节	地表反照率	向下短波辐射	向上短波辐射
春季	$y=1/(2.67+0.02x+0.000199x^2)$, $R^2=-0.30$	$y=23.39x^{0.85}-71.02$, $R^2=0.71$	$y=8.64x^{0.79}-21.72$, $R^2=0.71$
夏季	$y=1/(2.76+0.03x-0.00025x^2)$, $R^2=-0.36$	$y=11.48x^{0.98}-43.61$, $R^2=0.70$	$y=4.10x^{0.92}-12.03$, $R^2=0.68$
秋季	$y=1/(2.46+0.05x-0.00044x^2)$, $R^2=-0.39$	$y=29.83x^{0.84}-74.22$, $R^2=0.85$	$y=12.80x^{0.73}-23.90$, $R^2=0.82$
冬季	$y=1/(2.39+0.03x-0.00018x^2)$, $R^2=-0.08$	$y=8.51x^{1.19}-18.29$, $R^2=0.79$	$y=8.36x^{0.91}-17.59$, $R^2=0.53$

注：R^2为决定系数。

表4　不同沙漠地区各季节与全年平均地表反照率

Tab. 4　Seasonal and yearly mean surface albedo in different deserts

季节	塔克拉玛干沙漠南缘策勒站	塔克拉玛干沙漠腹地塔中	塔克拉玛干沙漠北缘肖塘	古尔班通古特沙漠	黑河流域沙漠
春季	0.31	0.28	0.27	0.35	0.27
夏季	0.29	0.34	0.26	0.25	0.26
秋季	0.30	0.29	0.27	0.26	0.30
冬季	0.38	0.31	0.29	0.61	0.34
平均值	0.32	0.28	0.27	0.37	0.30

天的变化趋势均呈现平滑的“U”型，与塔中站[1,23]的研究结果一致。策勒戈壁站在降雨和降雪天气向下长波辐射和向上长波辐射会显著高于其余各分量，而东帕米尔高只有在降雪时会出现该情况，策勒戈壁站在降雨天气的大气逆辐射较帕米尔高原会更强、大气的保温作用更好。

对我国不同沙漠地区之间的地表反照率进行对比（表4），塔克拉玛干沙漠北缘肖塘站[30]、古尔班

通古特沙漠[28]与策勒戈壁站地表反照率特征均表现为冬季>春季>秋季>夏季,冬季由于有积雪的覆盖,导致地表反照率最高,而夏季由于土壤湿度的影响所以地表反照率低,地表反照率的变化对下垫面的物理性质和含水量十分敏感[12]。塔中地表反照率夏季明显高于其他各季节,相对比,策勒戈壁站地表反照率冬季要明显高于其他各季节。沙漠地区地表反照率年均值表现为古尔班通古特沙漠>策勒戈壁站>黑河流域沙漠>塔中>肖塘。除塔中外,其余几处沙漠地区地表反照率冬季均受降雪、夏季受土壤湿度的影响明显。

4 结 论

(1) 策勒戈壁站的辐射平衡各分量逐日均值季节变化明显,各分量的变化幅度表现为向下短波辐射>向上长波辐射>向下长波辐射>向上短波辐射>净辐射。向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射、净辐射年总曝辐量分别为6053.31 MJ·m^{-2}、1841.44 MJ·m^{-2}、9800.34 MJ·m^{-2}、12496.89 MJ·m^{-2}、1515.32 MJ·m^{-2}。各分量季节日均值差异明显,向下短波辐射、向上短波辐射最大峰值出现在春季,而向下长波辐射、向上长波辐射、净辐射最大峰值出现在夏季。

(2) 策勒戈壁站辐射平衡各分量在不同天气状况下的变化趋势不同,晴天时各分量变化比较平滑。多云时变化趋势虽然波动较大,但整体上仍为"单峰型"。阴天波动较为强烈,变化趋势为"多峰型",降雨和降雪期间向下长波辐射和向上长波辐射要明显大于其他各分量。各季节向下短波辐射峰值整体上表现为晴天>多云>阴天>降雨(雪)。向上短波辐射、向上长波辐射、净辐射峰值变化与向下短波辐射保持相同的趋势,而向下长波辐射受空气湿度和天空云量的影响,在各天气的变化幅度较小。

(3) 策勒戈壁站地表反照率各季节平均值表现为冬季>春季>秋季>夏季,全年平均值为0.32。地表反照率日变化晴天受太阳高度角影响大,变化趋势较为平滑,在阴天和多云天气变化趋势不规则,降雨时地表反照率出现了明显的下降,而在降雪天气反照率增加趋势明显。

参考文献(References)

[1] 金莉莉, 何清, 买买提艾力·买买提依明, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地辐射平衡和反照率变化特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 215-224. [Jin Lili, He Qing, Mamtimin Ali, et al. Characteristics of the land surface radiation balance and land surface albedo in the Taklimakan Desert hinterland[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 215-224.]

[2] 李帅, 何清, 周立平, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地净辐射变化特征[J]. 干旱区研究, 2009, 26(5): 644-648. [Li Shuai, He Qing, Zhou Liping, et al. Research on net radiation characteristics at the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(5): 644-648.]

[3] 强耀辉, 王坤鑫, 马宁, 等. 羌塘高原申扎高寒湿地辐射平衡和地表反照率特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1207-1215. [Qiang Yaohui, Wang Kunxin, Ma Ning, et al. Characteristics of the radiation balance and surface albedo of a typical alpine wetland in Qiangtang Plateau[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1207-1215.]

[4] 张乐乐, 高黎明, 陈克龙, 等. 青海湖流域瓦颜山湿地辐射平衡和地表反照率变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1216-1222. [Zhang Lele, Gao Liming, Chen Kelong, et al. The variation characteristics of radiation balance and surface albedo in Wayanshan Wetland in the Qinghai Lake watershed[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1216-1222.]

[5] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245-254. [Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or gobi[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(2): 245-254.]

[6] 肖婉秋, 买买提艾力·买买提依明, 刘永强, 等. 中天山地区草地地表辐射收支演变规律[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4550-4560. [Xiao Wanqiu, Mamtimin Ali, Liu Yongqiang, et al. The rule of grassland surface radiation budget in the middle of Tianshan Mountains[J]. Acta Ecological Sinica, 2022, 42(11): 4550-4560.]

[7] 姚德贵, 刘唯佳, 韩永翔, 等. 太阳辐射短时临近预报R模型的构建及验证[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 47-55. [Yao Degui, Liu Weijia, Han Yongxiang, et al. Construction and validation of the R models for short-term solar irradiance forecasting[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 47-55.]

[8] Zhang X C, Gu S, Zhao X Q, et al. Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: 985-993, doi: 10.1029/2009JD012373.

[9] Matzinger N, Andretta M, Van E, et al. Surface radiation budget in an Alpine valley[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 129(588): 877-895.

[10] 赵文娜, 次仁尼玛, 王一楠, 等. 西藏羊八井地区地表辐射的时

间变化特征研究[J]. 高原科学研究, 2022, 6(4): 42-49. [Zhao Wenna, Tsering Nyima, Wang Yinan, et al. Study on the temporal variation of surface radiation at Yangbajing on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Plateau Research, 2022, 6(4): 42-49.]

[11] 岳平, 张强, 赵文, 等. 云和降雨扰动对黄土高原半干旱草地辐射收支及能量分配的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 1-14. [Yue Ping, Zhang Qiang, Zhao Wen, et al. Effects of clouds and precipitation disturbance on the surface radiation budget and energy balance over Loess Plateau semi-arid grassland in China[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 1-14.]

[12] 王国胜, 何清, 邢红艳, 等. 东帕米尔高原地表辐射收支及地表反照率特征[J]. 高原气象, 2023, 42(3): 619-631. [Wang Guosheng, He Qing, Xing Hongyan, et al. Surface radiation budget and surface albedo characteristics in eastern Pamir Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(3): 619-631.]

[13] 马伟强, 马耀明, 胡泽勇, 等. 藏北高原地面辐射收支的初步分析[J]. 高原气象, 2004, 23(3): 348-352. [Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Hu Zeyong, et al. Analyses on surface radiation budget in northern Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(3): 348-352.]

[14] 齐斐斐, 买买提艾力·买买提依明, 霍文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射和能量平衡及小气候特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 32-39. [Qi Feifei, Mamtimin Aili, Huo Wen, et al. Characteristics of surface radiation and energy balance and microclimate of Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(1): 32-39.]

[15] 高佳程, 司马义·阿不力孜, 买买提艾力·买买提依明, 等. 新疆东部黑戈壁地表辐射及能量收支演变特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(1): 70-77. [Gao Jiacheng, Abliz Isimayil, Mamtimin Ali, et al. Characteristics of surface radiation and energy budget of black gobi desert in eastern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2022, 16(1): 70-77.]

[16] 黄锐, 赵佳玉, 肖薇, 等. 太湖辐射和能量收支的时间变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 733-742. [Huang Rui, Zhao Jiayu, Xiao Wei, et al. Temporal variability of radiation and energy budgets over Lake Taihu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(5): 733-742.]

[17] 季国良, 邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 100-106. [Ji Guoliang, Zou Jiling. The seasonal variation of solar radiation budget over oases and desert in arid region[J]. Plateau Meteorology, 1994, 13(3): 100-106.]

[18] 王子超, 王春磊, 马俊俊. 沙尘天气下黑河流域大气长波辐射遥感估算[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 243-252. [Wang Zichao, Wang Chunlei, Ma Junjun. Estimation of downward surface longwave radiation in Heihe River Basin with remotely sensed data[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 243-252.]

[19] Han Z W, Dong Z B, Wang T, et al. Observations of several characteristics of aeolian sand movement in the Taklimakan Desert[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 47(1): 86-96.

[20] 王训明, 董治宝, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠中部部分地区风沙环境特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 59-64. [Wang Xunming, Dong Zhibao, Chen Guangting. Characteristics of blown sand environment in middle Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(1): 59-64.]

[21] 胡列群, 袁玉江. 塔克拉玛干沙漠辐射平衡研究[J]. 干旱区地理, 1996, 19(3): 16-23. [Hu Liequn, Yuan Yujiang. Surface radiation balance in Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 1996, 19(3): 16-23.]

[22] 何清, 徐俊荣. 塔克拉玛干沙漠散射辐射观测研究[J]. 干旱区地理, 1996, 19(4): 38-44. [He Qing, Xu Junrong. Study on scattered radiation in Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography, 1996, 19(4): 38-44.]

[23] 李帅, 胡列群, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射收支特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1035-1044. [Li Shuai, Hu Liequn, He Qing, et al. Surface radiation budget in hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 1035-1044.]

[24] 慕文玲, 霍文, 何清, 等. 塔中人工绿地与自然沙面辐射平衡对比研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 87-94. [Mu Wenling, Huo Wen, He Qing, et al. Comparison and research of the land surface radiation balance in the artificial vegetation and nature desert in the Taklimakan Desert[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(4): 87-94.]

[25] 付光祥, 何清, 王国胜, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘生态过渡区辐射平衡特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 116-128. [Fu Guangxiang, He Qing, Wang Guosheng, et al. Radiation balance characteristics of the ecological transition zone in the southern margin of the Taklamakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(5): 116-128.]

[26] 刘宏谊, 杨兴国, 张强, 等. 敦煌戈壁冬夏季地表辐射与能量平衡特征对比研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 558-565. [Liu Hongyi, Yang Xingguo, Zhang Qiang, et al. Contrast of ground surface radiation-energy balance in summer and winter on Dunhuang gobi[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3): 558-565.]

[27] He Q. The distribution of sand storms in Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Studies, 1996, 5: 185-193.

[28] 高佳程, 王豫, 阿吉古丽·沙依提, 等. 古尔班通古特沙漠地表辐射收支特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 47-58. [Gao Jiacheng, Wang Yu, Sayit Hajigul, et al. Characteristics of surface radiation budget in Gurbantunggut Desert[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 47-58.]

[29] Robinson D A, Kukla G. Albedo of a dissipating snow cover[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 23(12): 1626-1634.

[30] 周洒洒, 何清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘绿洲-荒漠过渡带辐射特征——以肖塘为例[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 43-51. [Zhou Sasa, He Qing, Jin Lili, et al. Radiation characteristics of oasis-desert transition zone in the northern margin of the Taklamakan Desert: A case study of Xiaotang[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(4): 43-51.]

Radiation balance and surface albedo characteristics of the gobi underlying surface in the southern margin of the Taklimakan Desert

XING Liwen[1,2], ZHAO Jingfeng[1,2], HE Qing[3], LI Juan[1,2], SU Huali[1,2], HE Yaling[1,2]

(1. College of Geography and Resource Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Southwest Land Resources Evaluation and Monitoring of Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, Sichuan, China; 3. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: The gobi, a prominent terrain feature in desert regions, exhibits surface characteristics markedly distinct from those of typical desert terrains. Therefore, it is imperative to investigate the radiation balance properties of the gobi's surface in desert environments to enhance the accuracy of parameters used in land-atmosphere energy exchange models, particularly in the Taklimakan Desert. Utilizing continuous observational data from the Qira gobi station, situated on the southern periphery of the Taklimakan Desert as part of the China-Japan Sand and Dust Storm Cooperation Project (ADEC), this study examines the diurnal variations in the components of surface radiation balance at the Qira gobi station throughout the year, across different seasons, and under various weather conditions. The findings indicate that: (1) The peak values for radiation components at the Qira gobi station are typically observed in July, with the exception of upward shortwave radiation, which peaks in January. (2) The diurnal variation maxima for downward and upward shortwave radiation are recorded in spring, whereas the peak values for downward longwave radiation, upward longwave radiation, and net radiation are noted in summer. (3) During sunny days, the radiation components exhibit a consistent trend across seasons, whereas under cloudy, overcast, and rainy conditions, their variations are erratic. Specifically, during precipitation events, both downward and upward longwave radiations significantly surpass the levels of other components. (4) The annual average surface albedo is calculated at 0.32. Notably, the albedo increases substantially during winter owing to snow cover, with the seasonal sequence from highest to lowest being winter, spring, autumn, and summer. The diurnal albedo variation, influenced by the solar zenith angle, forms a smooth "U" shape on clear days, whereas it fluctuates irregularly under different weather conditions.

Key words: radiation balance; net radiation; surface albedo; gobi subsurface cushion